

УДК 621.73.043

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КУЗНЕЧНОЙ ПРОТЯЖКИ ПОЛОС БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Богатов А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Обработка металлов давлением»
Нухов Д.Ш., аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» (danis_nuchov@mail.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Рассмотрено предложение о конструкции нового инструмента деформации и технологииковки литых слитков без изменения формы и размеров заготовки. Определена рациональная форма бойков, обеспечивающая однородную в объеме поковки значительную деформационную проработку слитка путем создания условий осуществления знакопеременной деформации. Суть предлагаемого решения заключается в следующем. Боек имеет два участка рабочей поверхности – гладкий и профильный. Профильный участок рабочей поверхности выполнен с выступами и углублениями в виде сегментов с цилиндрической поверхностью, расположенных к оси протяжки под углом 90°. В результате обжатия, за счет внедрения цилиндрических выступов гравюры бойков, высота заготовки уменьшается. Вытесненный металл заполняет углубления цилиндрической формы и высота заготовки в этом месте увеличивается. После смещения и обжатия заготовки на бойках с гладким участком она принимает исходные размеры, обеспечивая знакопеременную деформацию. При разработке технологического процесса установлена связь режимов обжатия с размерами заготовки и штампов с профильной поверхностью из условия полного заполнения гравюры штампа при осадке и обеспечения равномерного распределения деформации во всем объеме поковки.

Ключевые слова: литая структура, знакопеременная деформация, дисперсность структуры, математическое моделирование, напряженное и деформированное состояние, показатели напряженного состояния, степень деформации сдвига.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-422-428

Важной проблемой, стоящей перед отечественным машиностроением, является улучшение макро- и микроструктуры, повышение уровня механических свойств и эксплуатационной надежности металлопродукции. Применение непрерывнолитой заготовки по сравнению с горячекатаной позволяет снизить себестоимость продукции. Однако слитки, получаемые на МНЛЗ, необходимо предварительно проработать, получить мелкозернистую структуру и повысить технологическую пластичность [1]. Одним из эффективных способов получения мелкозернистой структуры считается деформация слитка без изменения формы поперечного сечения способом равноканального прессования. Этот способ разработан В.М. Сегалом [2] и заключается в многократном продавливании заготовки в специальной оснастке через два канала, пересекающихся обычно под углом 90°. Возможность получения ультрадисперсной структуры сталей и сплавов этим способом установлена в работах [2, 3]. Известны способыковки слитков бойками с комбинированной рабочей поверхностью [4 – 9]. Авторами работ [10 – 13] установлено, что применение комбинированных или вырезных бойков позволяет получать изделия высокого качества при минимальном изменении формы и размеров заготовки. Обеспечение высокого качества связано с развитием больших пластических деформаций в условиях действия сжимающих напряжений при знакопеременном

характере течения металла [14 – 21]. Знакопеременная деформация способствует увеличению накопленной деформации без изменения формы поперечного сечения заготовки, стимулирует образование полигонизованной субзернистой структуры и повышение дисперсности зеренной структуры. В работе исследовано деформированное состояние при ковке непрерывнолитой заготовки бойками специальной формы рабочей поверхности, обеспечивающими знакопеременную деформацию.

Моделирование процессаковки заготовок в профильных и гладких бойках в условиях плоской деформации

Применение инструмента с профильной и гладкой поверхностями позволяет получить на первом этапе обжатую заготовку с профильной поверхностью (рис. 1, а), а на следующем этапе обжатия плоскими бойками осуществить знакопеременную деформацию при выравнивании поверхности поковки (рис. 1, б). Для анализа зависимости режимов обжатия с размерами заготовки и штампов с профильной поверхностью использовался программный комплекс DEFORM-2D, в основу которого вложен метод конечных элементов [22]. В ходе решения задачи были приняты следующие допущения: задача решается в условиях плоско-деформированного состояния, модель материала заготовки – вязкопластическая среда (сталь AISI-1045, аналогичная стали 45),

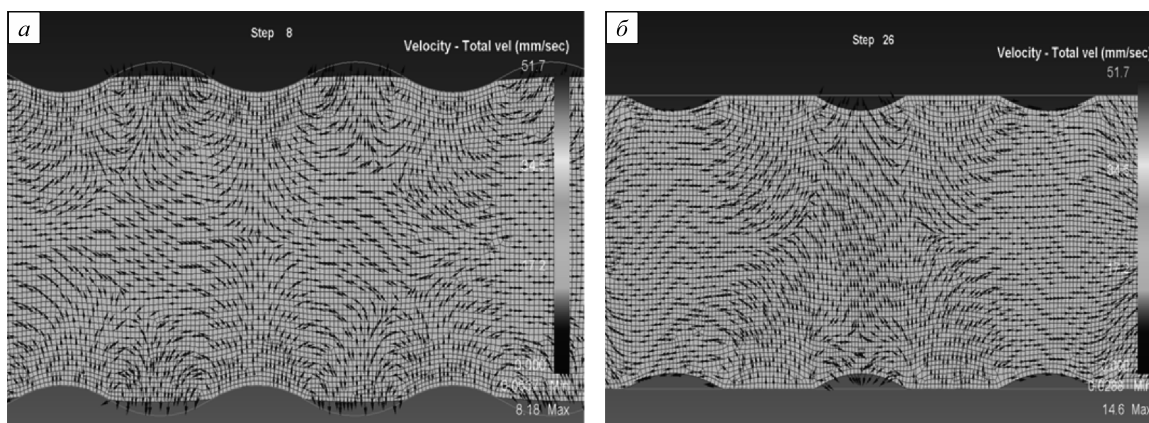


Рис. 1. Направление скорости течения частиц металла при обжатии заготовки на профильном (а) и плоском (б) участках бойка

Fig. 1. Direction of flow speed of metal particles at blank reduction on the profile (a) and the flat zones of the backup (б)

материал штампов – недеформируемая жесткая среда. Показатель трения (по Зибелю) между бойками и заготовкой принят равным $\psi = 0,6$. Для обеспечения высокой точности результатов расчета, минимальный размер элемента был принят равным 3 мм при высоте поковки 250, 300 и 350 мм.

Ширина поковки и бойков принята неограниченно большой, поэтому деформация заготовки в этом направлении отсутствует и выполняется условие плоской деформации. Для определения рациональной геометрии бойка на трех уровнях варьировали параметрами очага деформации e/r , r/h , $\Delta h/h$, где r – радиус цилиндров гравюры бойка; e – расстояние между центрами соседних элементов гравюры (углубление и выступ); h – высота заготовки; Δh – обжатие по высоте заготовки (рис. 2).

Заполнение металлом элементов гравюры бойка количественно оценивали через коэффициент заполнения $\delta = (h_{\text{ме}}/h_{\text{угл}}) \cdot 100\%$, где $h_{\text{ме}}$ – высота элемента поковки, заполнившего углубление на бойке; $h_{\text{угл}} = r - 0,5e$ – высота углубления бойка. Матрица планирования вычислительного эксперимента представлена в таблице. С целью упрощения процедуры твердотельного моделирования инструмента, варьирование параметра r/h осуществлялось изменением высоты заготовки: 250, 300, 350 мм, а значение радиуса осталось неизменным ($r = 50$ мм). Обжатие заготовки по высоте $(\Delta h/h) \cdot 100\%$ было принято 10, 14 и 20 %. Неравномерность деформации по высоте слитка оценивалась с помощью коэффициента вариации $S/\bar{\epsilon}_u$, где S – среднее квадратичное отклонение; $\bar{\epsilon}_u$ – среднее значение накопленной степени

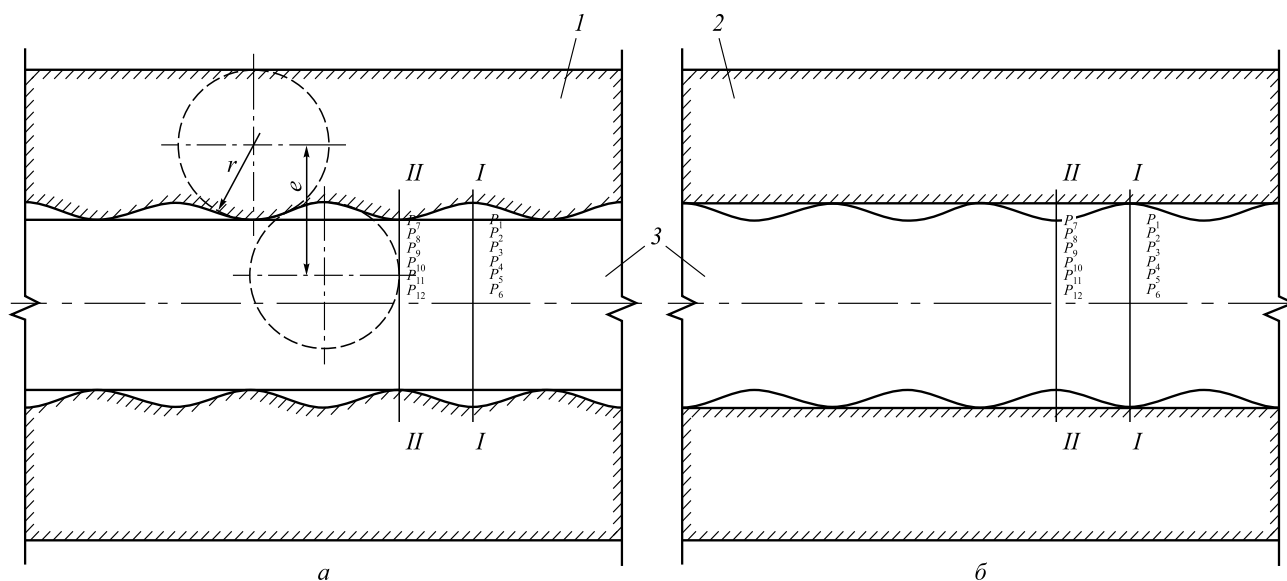


Рис. 2. Деформирование заготовки в бойках с профильной поверхностью на первом этапе обжатия (а) и плоскими бойками на втором этапе (б):

1 и 2 – рельефный и плоский боек соответственно; 3 – заготовка

Fig. 2. The blank deformation in the backups with the profile surface at the first stage of cobbing (a) and flat backups at the second stage (б): 1 and 2 – relief and flat backups; 3 – blank

деформации по высоте и определялась для двух сечений (под углублением I и выступом II гравюры бойка)

по шести точкам из выражения: $\bar{\varepsilon}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ui}$ (i – номер

частицы); $S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ui} - \bar{\varepsilon}_u)^2 \right]^{1/2}$. Расчет ε_{ui} в очаге

деформации на первом и втором этапе обжатия выполнен для шести частиц по высоте поковки в сечении углубления бойка (сечение I): P1 – P6, а также для шести частиц в сечении выступов бойка (сечение II): P7 – P12 (см. рис. 2).

Результаты расчета формоизменения и накопленной степени деформации при обжатии в профильных бойках с отношением $e/r = 0$ ($e = 0$, $r = 50$ мм) показали, что заполнение металла в полость углубления штампа во всем диапазоне значений r/h , $\Delta h/h$ не обес-

печивается (коэффициент заполнения δ изменяется в пределах $28,7 \div 60,6$ % (см. таблицу)). Кроме того, при всех вариантах обжатия (10, 14 и 20 %) для всех значений толщины заготовки h (250, 300 и 350 мм) деформация практически не проникает в осевую зону заготовки, а значение накопленной степени деформации в центральной зоне очага деформации составляет $\varepsilon_{u6} = 0,001 \div 0,050$ (сечение I) и $\varepsilon_{u12} = 0,084 \div 0,181$ (сечение II). После обжатия гладким участком бойков на втором этапе, значения суммарной степени деформации $\varepsilon_{\Sigma u}^6$ и $\varepsilon_{\Sigma u}^{12}$ не превышают 0,24 и 0,37 соответственно. Результаты решения задач при обжатии заготовки в бойках с отношением $e/r = 1$ ($e = 50$ мм, $r = 50$ мм) показали, что коэффициент заполнения увеличивается и находится в пределах $44,5 \div 94,6$ % (см. таблицу), а накопленная в осевой зоне деформация составляет: $\varepsilon_{u6} = 0,001 \div 0,055$; $\varepsilon_{u12} = 0,071 \div 0,256$. Значения сум-

Матрица полного факторного эксперимента 3^3

Matrix of full factorial experiment 3^3

Параметры очага деформации				Расчетные параметры				
				δ	ε_{u6}	$\varepsilon_{\Sigma u}^6$	ε_{u12}	$\varepsilon_{\Sigma u}^{12}$
$e/r = 0$	$r/h = 1/5$	$\Delta h/h$	0,10	28,7	0,001	0,162	0,0840	0,208
			0,14	43,4	0,002	0,222	0,0127	0,283
			0,20	48,6	0	0,230	0,1600	0,370
	$r/h = 1/6$	$\Delta h/h$	0,10	31,0	0,004	0,235	0,091	0,311
			0,14	44,4	0,005	0,214	0,102	0,255
			0,20	51,6	0,005	0,220	0,181	0,299
	$r/h = 1/7$	$\Delta h/h$	0,10	32,3	0,030	0,180	0,100	0,100
			0,14	45,5	0,050	0,210	0,100	0,103
			0,20	60,6	0,050	0,240	0,170	0,170
$e/r = 1,00$	$r/h = 1/5$	$\Delta h/h$	0,10	44,5	0,001	0,204	0,071	0,197
			0,14	68,4	0	0,370	0,090	0,250
			0,20	89,1	0,038	0,363	0,170	0,382
	$r/h = 1/6$	$\Delta h/h$	0,10	49,3	0,001	0,187	0,076	0,187
			0,14	72,5	0,001	0,274	0,109	0,274
			0,20	90,1	0,004	0,346	0,221	0,346
	$r/h = 1/7$	$\Delta h/h$	0,10	56,1	0,015	0,157	0,077	0,221
			0,14	76,4	0,017	0,298	0,012	0,479
			0,20	94,6	0,055	0,375	0,256	0,382
$e/r = 1,75$	$r/h = 1/5$	$\Delta h/h$	0,10	100,0	0,047	0,204	0,181	0,203
			0,14	100,0	0,064	0,291	0,230	0,406
			0,20	100,0	0,160	0,243	0,430	0,403
	$r/h = 1/6$	$\Delta h/h$	0,10	100,0	0,025	0,171	0,123	0,203
			0,14	100,0	0,068	0,257	0,227	0,324
			0,20	100,0	0,128	0,375	0,330	0,408
	$r/h = 1/7$	$\Delta h/h$	0,10	100,0	0,020	0,176	0,108	0,214
			0,14	100,0	0,065	0,232	0,157	0,315
			0,20	100,0	0,210	0,460	0,300	0,530

марной степени деформации после обжатия профильными и плоскими бойками $\epsilon_{\Sigma u}^6$ и $\epsilon_{\Sigma u}^{12}$ увеличиваются по сравнению с предыдущим вариантом и составляют 0,375 и 0,479 соответственно. Иная картина наблюдается при деформировании заготовки в профильных бойках с отношением $e/r = 1,75$ ($e = 87,5$ мм, $r = 50$ мм). Полное заполнение углублений бойка происходит при минимальном обжатии по толщине, равным 10 %. На рис. 3, 4 представлены графики, полученные по результатам исследованияковки заготовки в профильных бойках с отношением $e/r = 1,75$ при обжатии $(\Delta h/h) \cdot 100 \% = 10 \%$.

На рис. 3, а, б показан характер распределения накопленной степени деформации после обжатия на первом этапе профильными (рис. 2, а) и на втором этапе плоскими бойками (рис. 2, б) в сечении I, а на рис. 2, в, г – в сечении II. Видно, что распределение ϵ_u как в сечении I, так и в сечении II по высоте неравномерно, но при этом деформация проникает в центральную зону заготовки. Результаты расчета ϵ_u , представленные на рис. 3, позволяют определить рациональное значение

параметра $r/h = 1/5$. Суммарная степень деформации ϵ_u после первого и второго этапов обжатия бойками при $r/h = 1/5$ в центральной зоне заготовки достигает значений 0,204 (сечение I) и 0,214 (сечение II).

На рис. 4 показано распределение коэффициента вариации $S/\bar{\epsilon}_u$ в сечениях I (рис. 4, а) и II (рис. 4, б) в зависимости от параметра очага деформации r/h после суммарного обжатия на первом и втором этапах обжатия. Наименьшее значение $S/\bar{\epsilon}_u$ в очаге деформации с параметром $r/h = 1/5$: $S/\bar{\epsilon}_u = 0,21$ в сечении I и 0,15 в сечении II, что свидетельствует о высоком уровне однородности степени деформации в объеме поковки при минимальном обжатии.

Определение показателя напряженного состояния металла в очаге деформации при обжатии в профильных бойках в условиях плоской знакопеременной деформации

Знакопеременная деформация характеризуется количеством этапов n и амплитудой ϵ_i , причем на каждом этапе деформация является либо монотонной, либо

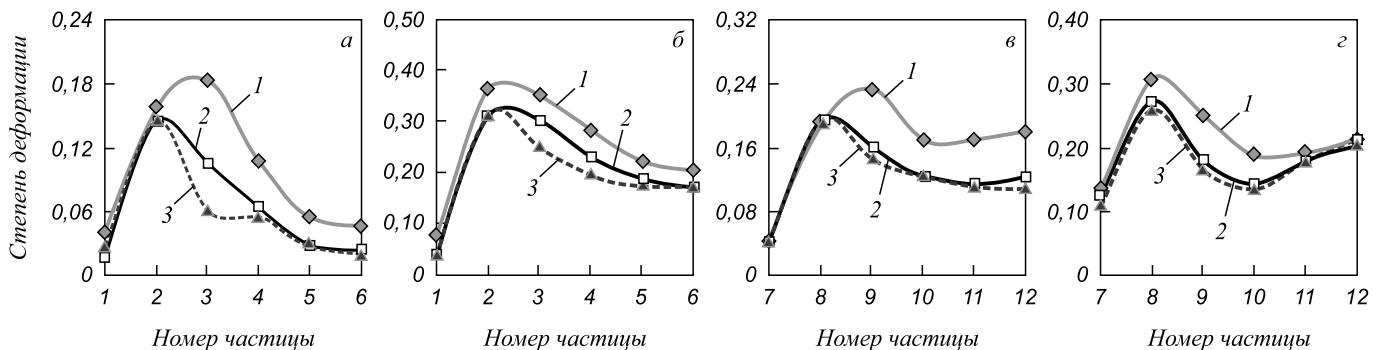


Рис. 3. Распределение степени деформации ϵ_u после первого (а) и второго (б) этапа деформации в сечении I (углубления бойка) и после первого (в) и второго (г) этапа деформации в сечении II (выступа бойка) при r/h :
1 – 1/5; 2 – 1/6; 3 – 1/7

Fig. 3. The distribution of the deformation degree ϵ_u after the first (а) and second stages (б) of deformation in cross section I (deepening of the backup) and after the first (в) and second (г) stages of deformation in section II (protrusion of the backup) when r/h :
1 – 1/5; 2 – 1/6; 3 – 1/7

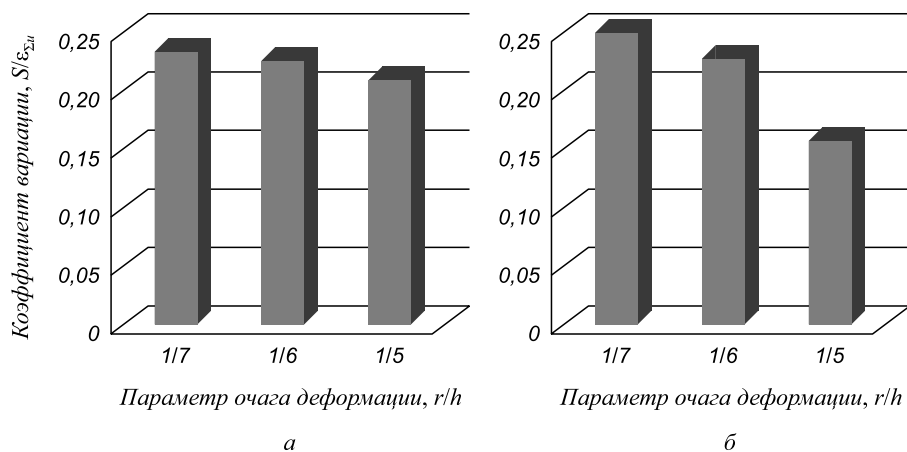


Рис. 4. Коэффициенты вариации $S/\bar{\epsilon}_u$ в зависимости от параметра очага деформации r/h в сечениях I (а) и II (б)

Fig. 4. The variation coefficients $S/\bar{\epsilon}_u$ depending on the parameter of the deformation point r/h in sections I (а) and II (б)

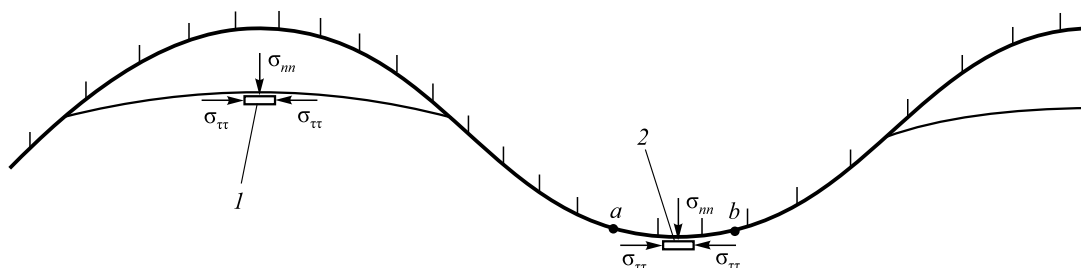


Рис. 5. Действие напряжений на свободной и контактной поверхностях заготовки:
1 – свободная поверхность; 2 – контактная поверхность; $\sigma_{т\tau}$, $\sigma_{нн}$ – нормальные напряжения

Fig. 5. The effect of stresses on the free and contact surfaces of the blank:
1 – the free surface; 2 – the contact surface; $\sigma_{т\tau}$, $\sigma_{нн}$ – normal stresses

квазимоноотонной и отвечает условиям: $\omega_k = 0$, либо $\text{sign } \omega_k = \text{const}$. Здесь ω_k – компоненты антисимметричного тензора скорости жесткого вращения материальной частицы в сопутствующей системе координат, построенной на базисе собственных векторов тензора скоростей деформации [14]. Применение инструмента с профильной поверхностью позволяет получить обжатую заготовку с профильной поверхностью и дает возможность на следующем этапе обжатия на гладкой поверхности бойков осуществить при выравнивании поверхности поковки знакопеременную деформацию (см. рис. 1). При плоской деформации интенсивность касательных напряжений равняется максимальному касательному напряжению, равному пределу текучести на сдвиг: $T = \tau_{\max} = \tau_s$, а условие идеальной пластичности имеет вид: $\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s$, где σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения. Главное нормальное напряжение, перпендикулярное плоскости течения, равно среднему нормальному напряжению: $\sigma_2 = \sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$. Учитывая граничные условия для плоской деформации при ковке слитков: $\sigma_{нн} = \sigma_1$; $\sigma_{т\tau} = \sigma_3$ и $\sigma_{zz} = \sigma_2 = (\sigma_{т\tau} + \sigma_{нн})/2$, где $\sigma_{т\tau}$ и $\sigma_{нн}$ – нормальные напряжения (рис. 5), на свободной поверхности (рис. 5, поз. 1) $\sigma_{нн} = 0$, следовательно $\sigma_{т\tau} = -2\tau_s$, а $\sigma_{zz} = -\tau_s$, тогда напряженное состояние на свободной поверхности $\sigma/T = -1$ ($T = \tau_s$ – условие идеальной пластичности). На поверхности контакта (рис. 5, поз. 2) $\sigma_{т\tau} = \sigma_1 = -3,14\tau_s$; $\sigma_{нн} = -5,14\tau_s$; $\sigma_{zz} = \sigma_2 = -4,14\tau_s$, следовательно $\sigma/T = -4,14$. Таким образом, показатель напряженного состояния находится в диапазоне $-4,14 \leq \sigma/T \leq -1$, т. е. созданы благоприятные условия по напряженному состоянию, способствующие эффективной деформационной проработке литой структуры металла.

Выводы. В результате анализа формоизменения и деформированного состояния металла в предложенном способековки определена форма инструмента деформации из условия полного заполнения металлом углублений штампа, а также обеспечения однородности деформации по всему объему литой заготовки. На первом этапе при минимальном обжатии заготовки бойками 10 % с $e/r = 1,75$ металл полностью заполняет гравюру бойка (коэффициент заполнения $\delta = 100$ %). При вы-

равнивании заготовки на втором этапе обжатия минимальные значения коэффициента вариации $S/\bar{\epsilon}_u = 0,2$ и $0,15$ для сечения под углублением I и выступом II бойка соответственно были получены при использовании заготовки с отношением $r/h = 1/5$. Значения показателя напряженного состояния в очаге деформации при осадке в бойках находятся в пределах $-4,14 \leq \sigma/T \leq -1$, что способствует созданию благоприятных условий эффективной деформационной проработки литой структуры металла. Таким образом, способковки и предлагаемая конструкция инструмента, предложенная в работе, обеспечивают однородную знакопеременную деформационную проработку непрерывнолитого слитка без изменения исходных формы и размеров заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логунова А.С., Парсункин Б.Н. Определение областей непрерывнолитой заготовки с наибольшей вероятностью нарушения сплошности металла. // Вестник уральского государственного технического университета – УПИ. 2004. Т. 1. С. 95 – 98.
2. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115 – 123.
3. Процессы пластического структурообразования / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов и др. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
4. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis // Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 72. P. 32 – 41.
5. Dyja H., Banaszek G., Berski S., Mroz S. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vols. 157 – 158. P. 496 – 501.
6. А. с. 774756 СССР, МКИ В 21 J 13/22. Комбинированные бойки / А.В. Котелкин, В.А. Петров; заявл. 23.01.79; опубл. 30.10.80, Бюл. № 40.
7. А. с. 442878 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Кузнечный инструмент / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, С.Д. Баранов; заявл. 01.07.71; опубл. 15.09.74, Бюл. № 34.
8. А. с. 393018 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Инструмент дляковки / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин и др.; заявл. 30.03.71; опубл. 10.08.73, Бюл. № 33.
9. А. с. 339089 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Устройство дляковки заготовок / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин; заявл. 17.06.71; опубл. 30.03.79, Бюл. № 12.
10. Воронцов В.К., Найзабеков А.Б., Котелкин А.В., Петров В.А. Условия развития сдвиговых деформаций при ковке заготовок в

- ступенчатых бойках // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 5. С. 50 – 53.
11. Машеков С.А. Исследование деформированного состояния заготовок при ковке в вырезных и комбинированных бойках // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 4. С. 36 – 39.
 12. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 5. С. 27 – 29.
 13. Охрименко Я.М., Тюрин В.А., Лебедев В.Н., Гринюк А.И. Улучшение качества металла при продольной ковке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 4. С. 96 – 99.
 14. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металла: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 328 с.
 15. Богатов А.А., Мижирицкий И.О., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
 16. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
 17. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 9. С. 7 – 13.
 18. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывнолитой заготовки/ Черные металлы. 2012. Март. С. 18 – 21.
 19. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1. С. 208 – 216.
 20. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
 21. Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н., Толеуова А.Р. Исследование процесса деформирования заготовки в равноканальной ступенчатой матрице // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 16 – 18.
 22. Паршин В.С., Карамышев А.П., Некрасов И.И. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

Поступила 15 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 6, pp. 422–428.

FINAL AND ELEMENT MODELLING OF THE FORGE BROACH OF STRIPS WITHOUT CHANGE OF FORM AND SIZES IN THE CONDITIONS OF ALTERNATING DEFORMATION

Bogatov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metal Forming”

Nukhov D.Sh., Postgraduate of the Chair “Metal Forming” (danis_nuchov@mail.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The paper considers a proposal to design a new tool deformation and forging technology of cast ingots without changing the shape and size of the blank. The rational form of backups was determined, providing a uniform in volume significant deformation elaboration of the ingot by facilitating the implementation of an alternating strain. The essence of the proposed solution is as follows. The backup has two sections of the working surface: smooth and profiled. The profile zone of the working surface is provided with projections and recesses in the form of segments of a cylindrical surface arranged to broach axis angle 90° (Fig. 1). As a result of reduction, due to the introduction of cylindrical protrusions of the engraving of the dies, the height of the blank is reduced. The displaced metal fills the recess of the cylindrical shape and the height of the blank at that location is incremented (Fig. 1, a). After the displacement and reduction of the blank in the dies with a smooth area, it takes the original size (Fig. 1, b), providing the alternating deformation. During the development of the technological process, the correlation of the reduction modes with the size of the blank and stamps with profile surface at conditions of complete filling of the engraving of the stamp at a deposit and ensure uniform distribution of deformation throughout the volume of the forging.

Keywords: cast structure; alternating deformation; degree of dispersion; math modeling; stressed and strained states; stressed state parameters; degree of shear strain.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-422-428

REFERENCES

1. Logunova A.S., Parsunkin B.N. Identification of areas of continuously-casted billets with the highest probability of metal disconti-

nuity. *Vestnik ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – UPI*. 2004. Vol. 1, pp. 95–98. (In Russ.).

2. Segal V.M., Reznikov V.I., Drobyshevskii A. E., Kopylov V. I. Plastic metal processing by simple shear. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1981, no. 1, pp. 115–123. (In Russ.).
3. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. etc. *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya* [Plastic structure formation processes]. Minsk: Nauka i tekhnika. 1994. 232 p. (In Russ.).
4. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997. Vol. 72, pp. 32–41.
5. Dyja H., Banaszek G., Berski S., Mroz S. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vols. 157–158, pp. 496–501.
6. Kotelkin A.V., Petrov V.A. *Kombinirovannye boiki* [Combined backups]. Certificate of authorship USSR 774756 SSSR: MKI V 21 J 13/22, no. 2715513, *Byulleten' izobretenii*. 1980, no. 40. (In Russ.).
7. Okhrimenko Ya.M., Tyurin V.A., Baranov S.D. *Kuznechnyi instrument* [Forging tool]. Certificate of authorship USSR 442878 SSSR: MKI V 21 J 13/02, no. 1623639, *Byulleten' izobretenii*. 1974, no. 34. (In Russ.).
8. Okhrimenko Ya.M., Tyurin V.A., Mishchenkov Yu.I., Ekarev M.S. *Instrument dlya kovki* [Tools for forging]. Certificate of authorship USSR 393018 SSSR: MKI V 21 J 13/02, no. 1643794. *Byulleten' izobretenii*. 1973, no. 33. (In Russ.).
9. Okhrimenko Ya.M., Tyurin V.A. *Ustroistvo dlya kovki zagotovok* [Device for blanks forging]. Certificate of authorship USSR 339089 SSSR: MKI V 21 J 13/02, no. 1666176, *Byulleten' izobretenii*. 1979, no. 12. (In Russ.).
10. Vorontsov V.K., Naizabekov A.B., Kotelkin A.V., Petrov V.A. Conditions of shear deformation in blanks forging at step backups. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 5, pp. 50–53. (In Russ.).
11. Masekov S.A. The research of deformed state of blanks at forging at cutting and combined backups. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 4, pp. 36–39. (In Russ.).
12. Tyurin V.A. Innovative technologies of forging. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo*. 2006, no. 5, pp. 27–29. (In Russ.).

13. Okhrimenko Ya.M., Tyurin V.A., Lebedev V.N., Grinyuk A.I. Improving the quality of metal at longitudinal forging. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1971, no. 4, pp. 96–99. (In Russ.).
14. Bogatov A.A. *Mekhanicheskie svoistva i modeli razrusheniya metalla. Uchebnoe posobie* [The mechanical properties and models of metal fracture. Textbook]. Ekaterinburg: UGTU-UPI. 2002. 328 p. (In Russ.).
15. Bogatov A.A., Mizhiritskii I.O., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* [Resource of metals plasticity at metal forming]. Moscow: Metallurgiya. 1984. 144 p. (In Russ.).
16. Potapov I. N., Polukhin P. I. *Tekhnologiya vintovoi prokatki* [Technology of screw rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 344 p. (In Russ.).
17. Panov E.I., Eskin G.I. Effect of helical rolling on the structure and properties of hypereutectic silumin. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2004, no. 9, pp. 7–13.
18. Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. Development and implementation of production technology of high-quality compressor tubes from continuously-casted billets. *Chernye metally*, 2012, no. 3, pp. 18–21. (In Russ.).
19. Valiev R.Z. Creation of nanostructured metals and alloys with unique properties, using the severe plastic deformations. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2006. Vol. 1–2, p. 208. (In Russ.).
20. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei* [Nanostructured materials produced by severe plastic deformation]. Moscow: Logos, 2000. 272 p. (In Russ.).
21. Naizabekov A.B., Ashkeev Zh.A., Lezhnev S.N., Toleuova A.R. The study of the deformation process of workpiece in equal channel matrix *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 2, pp. 16–18. (In Russ.).
22. Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu Deform-3D* [A practical guide to program complex Deform-3D]. Ekaterinburg. UrFU, 2010. 266 p. (In Russ.).

Received January 15, 2015